

# 14. ビリアル限界コイルを用いた小型トカマク装置におけるプラズマに関する研究

飯尾研究室 02M19050 榎田拓郎

## 1. はじめに

ビリアル限界コイル (VLC) は、トロイダル磁場コイルと変流器コイルを一体としたヘリカル型ハイブリッドコイルである。これを磁場コイルとして用いるトカマク装置「等々力2号」において、プラズマの電流制御と位置制御が課題となる。本装置において、真空容器に流れる渦電流の影響に加え、VLC が離散的に支持されているために、誤差磁場が生じる。また、周回電圧が高い割にはプラズマ電流が小さいという問題がある。

そこで、本研究では、生成プラズマの性能を改善するためにグロー放電洗浄を行った。また、プラズマの位置特性について調べるために、プラズマ発光分布の計測を行った。

## 2. 等々力2号の概要

「等々力2号」の主要パラメータについて表1にまとめている。

| 表1 等々力2号の装置諸元と計測器 |   |
|-------------------|---|
| 真空容器：             | 大半径 0.3 m、小半径 0.08 m  |
| 磁場コイル：            | ビリアル限界コイル (VLC)<br>(大半径 0.3 m、小半径 0.14 m)<br>プラズマ水平位置制御用コイル |

到達真空度： $1.2 \times 10^{-4}$  Pa

| 計測器         | 計測対象                  |
|-------------|-----------------------|
| ワンターンループ：   | 周回電圧<br>プラズマ位置        |
| 磁気プローブ：     | プラズマ位置                |
| ログスキーコイル：   | プラズマ電流                |
| トロイダル磁束ループ： | トロイダル磁場               |
| ダブルプローブ：    | グロープラズマの<br>電子温度・電子密度 |
| 四重極分析器：     | ガス分圧                  |
| 発光分布検出器：    | プラズマ位置                |

図1に等々力2号に用いているビリアル限界コイルの模式図を示す。青色で1本のヘリカル巻線を示している。

## 3. 放電洗浄

本研究では、水素ガスを用いたグロー放電による

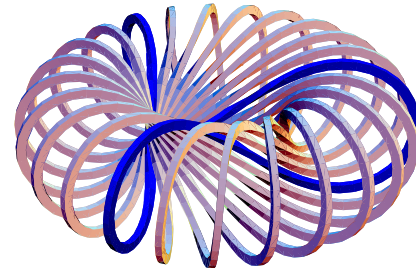


図1 等々力2号に用いているビリアル限界コイルの模式図

放電洗浄を行った。また、直流放電とパルス放電の異なる2つの方式による洗浄結果についての比較を行った。まず、放電用陽極は銅製で、先端には直径20mmの円形の銅板が取り付けられており、真空容器の垂直ポートに1本設置している。グロー放電洗浄では洗浄すべき面を陰極とするため、真空容器が陰極となる。これにより、電場により加速された水素イオンは真空容器内壁に衝突し、壁に付着した不純物は気相にたたき出され、排気される。それぞれの放電方式の回路図を図2, 3に、放

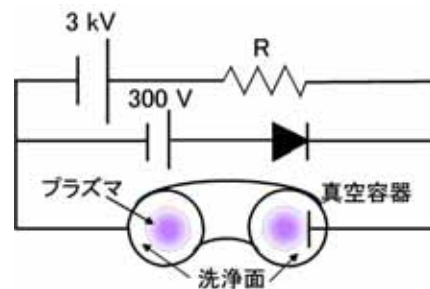


図2 直流グロー用放電回路

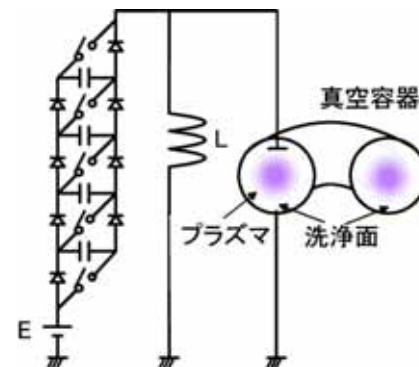


図3 パルスグロー用放電回路

表 2 放電洗浄条件

| 放電方式 | 直流放電        | パルス放電                  |
|------|-------------|------------------------|
| 電圧   | 3 kV, 300 V | 2 kV, 400 V            |
| 電流   | 30 mA       | 500 mA(ピーク), 30 mA(平均) |
| 圧力   | 0.3 Torr    | 0.3 Torr               |
| 放電時間 | 12 h        | 12 h                   |
| 電子温度 | ~ 1.5 eV    | ~ 1.5 eV               |

電条件を表 1 に示す。直流放電では、まず電圧 3 kV でプラズマを生成し、その後電圧 300 V、電流 30 mA で維持する。パルス放電回路は、4 つのコンデンサが並列に充電され、スイッチがオンすると 4 直列で放電するマルクス回路である。パルス放電の周波数は 2 kHz であり、高周波放電とは異なる周波数域で行っている。直流放電と比較するために、時間平均電流を 30 mA とした。燃料には水素ガスを用い、圧力 0.3 Torr でそれぞれ 12 時間ずつ交互に行った。

図 4 に放電洗浄中に計測したマスペクトル例を示す。質量数が 18、28、29 に大きなピークが見られる。クラッキングパターンから、18 は  $H_2O$ 、28、29 は  $C_2H_4$ 、 $C_2H_6$  であり、酸素は主に水、炭素は炭化水素となって排気されている。図 5 に水とエチレン/エタンの分圧の時間変化を示す。縦軸は分圧に比例したイオン電流である。

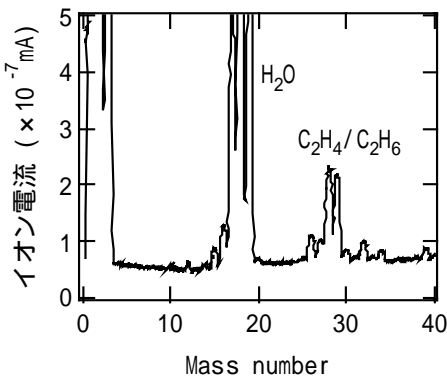


図 4 マスペクトルの例

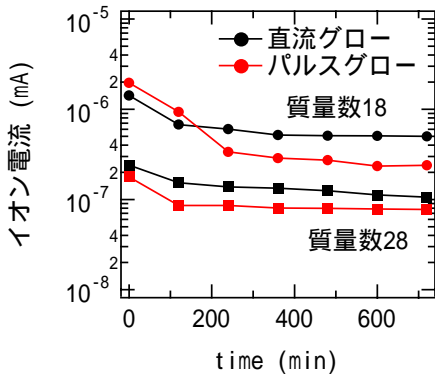


図 5 放電洗浄中の分圧の時間変化

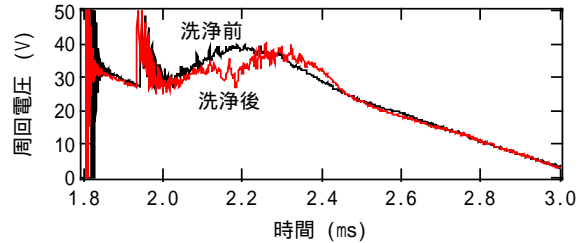
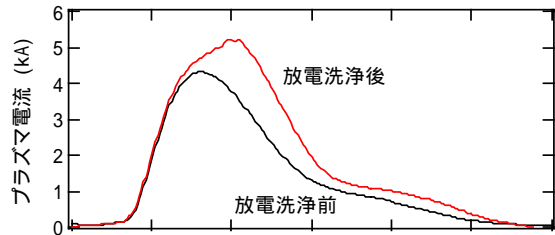


図 6 直流グローによる放電洗浄前後のトカマク放電波形

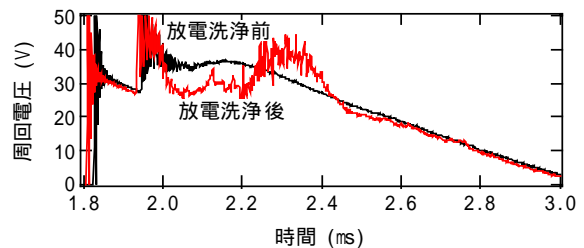
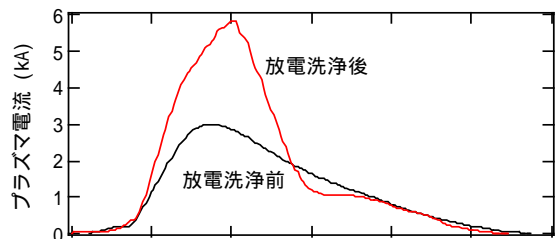


図 7 パルスグローによる放電洗浄前後のトカマク放電波形

どちらの放電の場合も 360 分を過ぎるとほぼ一定の値になっている。また、不純物のイオン電流の減少を比較すると、パルスグローによる結果の方が速いことがわかる。

図 6、7 には放電洗浄前後におけるプラズマ電流波形と周回電圧波形の比較を示す。このときのトカマク放電電圧は 5 kV、水素ガス圧力  $2.25 \times 10^{-4}$  Torr である。放電洗浄後には、プラズマ電流の最高値は直流グローの場合 1.2 倍、パルスグローの場合 1.9 倍になり、パルス幅の長いプラズマ電流波形が得られた。但し、パルスグロー放電洗浄前のプラズマ電流は直流の場合に比べ、最大値が小さい。これは真空漏れにより水素の純度が下がったためである。しかしながら、洗浄後のプラズマ電流の最大値は直流の場合よりも大きな

った。これにより、直流グローとパルスグローによる放電洗浄効果を比較すると、パルスグローの方が定量的には洗浄効果が大きいことが示された。この理由としては、パルスグローの電流のピーク値が大きいことが効いていると考えられる。

#### 4. プラズマの位置特性

まず、プラズマの大半径方向の平衡のために必要な外部から加える垂直磁場は次式で表される。

$$B_z = -\frac{\mu_0 I_p}{4\pi R} \left( \ln \frac{8R}{a} + \frac{l_i}{2} - \frac{3}{2} + \beta_p \right)$$

$I_p$ : プラズマ電流、 $R$ : プラズマ大半径

$k$ : 内部インダクタンス、 $a$ : プラズマ小半径

$p$ : プラズマ圧力とポロイダル磁場圧力の比  
この式より、等々力2号においてプラズマ電流5 kA のとき 50 G の垂直磁場が必要と評価される。本装置では、垂直磁場コイル電源 150 V のときに 50 G の垂直磁場を発生することができる。

次に、フォトダイオードアレイを用いた発光分布検出器について以下に述べる。プラズマはリミタ半径内に生成されるので、図8に示すようにフォトダイオードアレイをポート内に取り付ける必要がある。そのため、図8中の赤線で示す石英窓付きのパイプを各ポートに取り付け、その中にフォトダイオードを設置した。垂直ポートに設置したものから大半径方向の位置を、水平ポートに設置したものから垂直方向の位置を計測する。図9には計測で使用したチャンネルを示す。大半径方向、垂直方向ともに中心位置に対して対称に選んで計測を行った。また、フォトダイオードの分光感度を図10に示す。本研究では全波長領域で計測を行っているが、フィルタを用いれば分光計測も可能である。

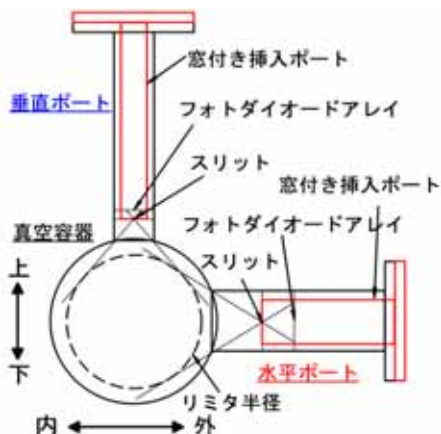


図8 フォトダイオードアレイ設置概要

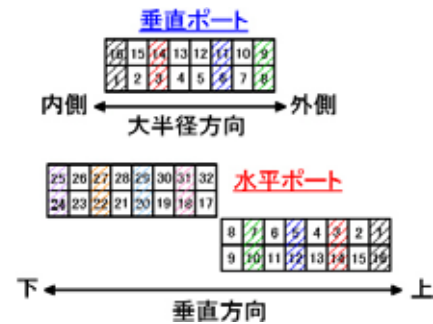


図9 計測に使用したチャンネル

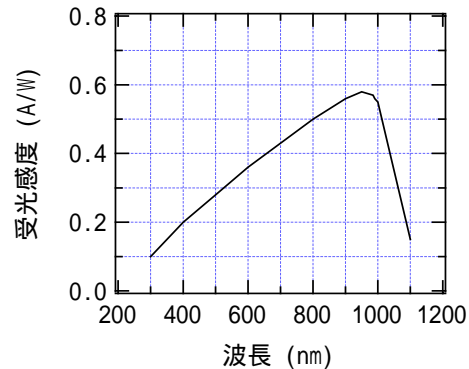


図10 Si フォトダイオードの分光感度特性

図11にプラズマ電流とプラズマ光の波形を示す。プラズマ光波形はピークの前後で振動している。この振動はチャンネルによって時間的にずれており、またログスキーコイルの出力結果と比較するとほぼ同期していることから、プラズマの不安定性によるものだと考えられる。

図12に垂直磁場を印加していない場合の0.1 ms毎のプラズマ光強度の空間分布を示す。大半径方向に対して、プラズマ電流のピーク前後ではトラス外側に広がっている。それ以降は、真空容器中心位置に留まってプラズマは消えている。また、垂直方向に対しては、ほぼ赤道面位置に平衡がとれている。図13に垂直磁場を印加した場合のプラズマ電流、垂直磁場コイル電流波形を、図14に0.1 ms毎のプラズマ光強度の空間分布

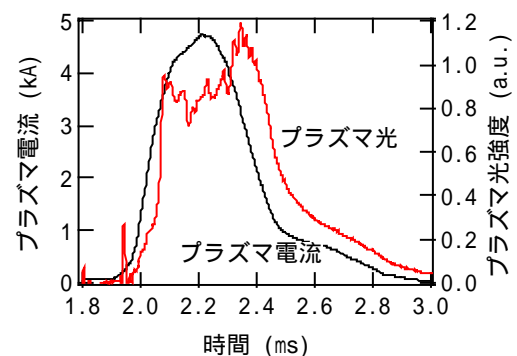


図11 プラズマ電流及びプラズマ光の波形

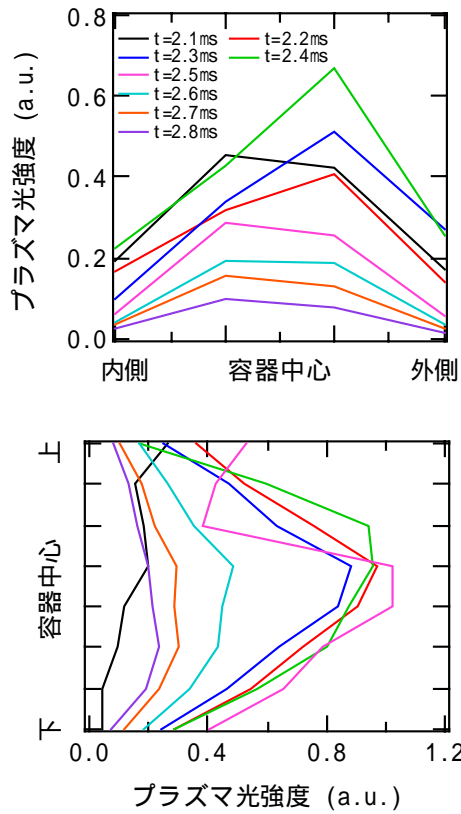


図12 垂直磁場を印加しない場合のプラズマ光強度の空間分布の時間変化

を示す。このときの垂直磁場コイル電源のコンデンサ充電電圧は150 Vで、2.0 msの時刻に垂直磁場を印加している。垂直磁場を印加したことにより、プラズマ電流のピーク前後において大半径方向に対して真空容器中心位置にプラズマの平衡がとれた。しかし、その時間を過ぎると、プラズマが外に拡がろうとする力よりも垂直磁場による力が強くなる。それゆえに、プラズマは内側へシフトしている。また、垂直方向に対しては垂直磁場によりわずかに下側へ押されているが、プラズマは赤道面付近に平衡がとれている。また、垂直磁場の強さによるプラズマ位置特性への影響について調べた。垂直磁場が強くなると、プラ

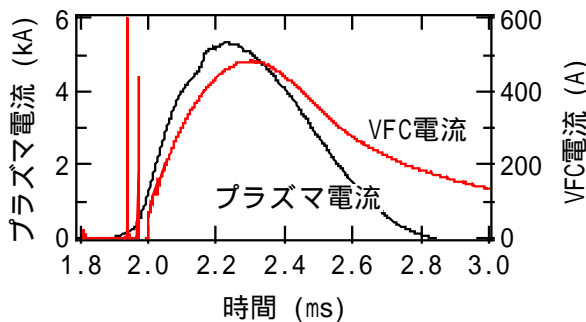


図13 プラズマ電流、垂直磁場コイル電流波形

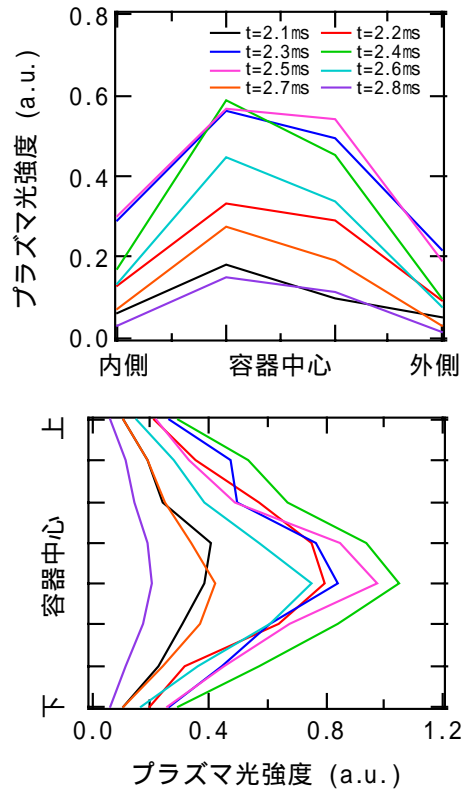


図14 垂直磁場を印加した場合のプラズマ光強度の空間分布の時間変化

ズマが外に拡がろうとする力よりも強くなり、プラズマは大半径方向では内側に押されてしまうことを確かめた。また、垂直磁場の印加タイミングを遅らせると、2.2 msまではプラズマは内側に押されてしまうが、2.3 msになると、垂直磁場の効果が弱くなり、プラズマは外側に拡がること became clear.

#### 5. まとめ

グロー放電洗浄を行ったことにより、洗浄後のプラズマ電流は最大値が増加し、パルス幅の長い波形が得られた。また、直流グローとパルスグローによる放電洗浄の比較を行い、パルスグローの方が洗浄効果が大きいことが明らかになった。

プラズマ発光分布計測によりプラズマの位置特性について調べ、ビリアル限界コイルを用いたトカマク装置においてプラズマの位置制御性に問題がないことを実証した。

#### 6. 今後の課題

フィードバック制御が可能な垂直磁場コイル電源の製作を行い、プラズマの水平位置制御を行う。